

# **Uso de redes neurais artificiais para mapeamento de biomassa e carbono orgânico no componente arbóreo de uma floresta ombrófila densa**

## **Artificial neural networks in the biomass and organic carbon mapping of the arboreal component of a dense ombrophile forest**

Emerson Roberto Schoeninger<sup>1</sup>  
Henrique Soares Koehler<sup>2</sup>  
Mosar Farias Botelho<sup>3</sup>  
Luciano Farinha Watzlawick<sup>4</sup>  
Paulo Costa de Oliveira<sup>5</sup>

### **Resumo**

O objetivo principal do presente estudo foi utilizar imagens do satélite IKONOS II para obter mapas temáticos para estimativas de biomassa arbórea e da quantidade de carbono orgânico armazenado em uma Floresta Ombrófila Densa. A área total avaliada foi de 3.800 hectares, dos quais 3.324 hectares são cobertos atualmente por floresta natural. Na primeira etapa do estudo foram levantadas 48 amostras de 2700 m<sup>2</sup>, onde todos os indivíduos com diâmetro a 1,30 metros do solo (dap) acima de 10 cm foram medidos e identificados. Na segunda etapa, com base nos resultados advindos do inventário florestal, 219 árvores foram abatidas, mensuradas e pesadas em toda sua parte aérea para a determinação de sua biomassa arbórea e quantidade de carbono armazenado. As estimativas obtidas foram relacionadas com dados oriundos das bandas das imagens do satélite IKONOS II. Foi verificado o desempenho de Redes Neurais

- 
- 1 Dr.; Engenheiro Florestal; Klabin Florestal-SC; E-mail: erschoeninger@ibest.com.br
  - 2 Dr.; Engenheiro Florestal; Professor do Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo da Universidade Federal do Paraná-UFPR; E-mail: koehler@ufpr.br
  - 3 Dr.; Engenheiro; Professor na Universidade Tecnológica Federal de Dois Vizinhos; E-mail: mfbotelho@yahoo.com.br
  - 4 Dr.; Engenheiro Florestal; Professor do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual do Centro-Oeste-UNICENTRO; Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq; E-mail: Luciano.watzlawick@pq.cnpq.br
  - 5 Dr.; Engenheiro Florestal; Professor do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste-UNICENTRO; E-mail: paulocostafh@irati.unicentro.br

Recebido para publicação em 14/11/2006 e aceito em 30/11/2007

---

Ambiência    Guarapuava, PR    v.4 n.2    p.179-195    Maio/Ago. 2008    ISSN 1808 - 0251

---

Artificiais (RNA). As estimativas obtidas geraram mapas temáticos de biomassa arbórea e da quantidade de carbono armazenado. A biomassa arbórea total média estimada foi de 141,4 t ha<sup>-1</sup>, enquanto a média de carbono armazenado na vegetação foi de 59,3 t ha<sup>-1</sup>. O teor de carbono médio determinado na vegetação arbórea foi de 422 g kg<sup>-1</sup>. A arquitetura de RNA que apresentou melhores resultados foi com 12 neurônios na camada de entrada e 4 na camada escondida, para um limiar de erro de 0,01, para ambas as variáveis estimadas. O erro percentual médio em relação às amostras de verificação foi de 3,73 e 3,59%, para biomassa e quantidade de carbono, respectivamente. O uso de RNA mostrou estimativas mais exatas para as variáveis estudadas do que a equação de regressão linear. A técnica de Redes Neurais Artificiais mostrou-se promissora na obtenção de estimativas de variáveis biométricas no setor florestal, sendo o estudo de outras variáveis e a aplicação da técnica em outras áreas recomendáveis para seu uso de forma mais ampla.

**Palavras-chave:** biomassa; carbono; redes neurais; mapas temáticos.

## Abstract

The main objectives of the study have been to use IKONOS II images to create thematic maps for dry above ground biomass and carbon quantities stored in a Dense Ombrophilous Forest. The total area covered by the study was 3.800 hectares, of which 3.324 hectares are currently covered by a natural forest. At the first study stage, 48 samples of 2.700 m<sup>2</sup> were taken for forest inventory purposes, where all trees with dbh greater than 10 cm were measured and identified. Once the results of the forest inventory were available, 219 trees were cut and had their different fresh portions measured and weighted for biomass and carbon determination. The estimates obtained were related with data from the IKONOS II satellite bands. The performance of Artificial Neural Networks (ANN) was verified. The estimates of above ground dry biomass and carbon amount stored generated thematic mappings of these variables. The average total dry biomass estimated was 141.4 t ha<sup>-1</sup>, while the average amount of stored carbon was 59.3 t ha<sup>-1</sup>. The average carbon rate estimated for the above ground vegetation was 422 g kg<sup>-1</sup>. The best ANN architecture showed 12 neurons as input and 4 for output for 0,01 threshold error, for both estimated variables. The average percentage error for the validation samples was 3,73 and 3,59% for dry biomass and carbon content, respectively. The use of ANN showed more accurate estimates for the studied variables than the linear regression equation. The ANN technique showed very promising results for estimating

biometric variables in forestry. The study of additional variables and the application of the technique in other fields is highly recommended in order to spread its use.

**Key words:** dry biomass; carbon storage; neural networks; thematic maps.

## Introdução

Tratando-se de tema atual, o acúmulo de carbono na atmosfera, oriundo da queima de combustíveis fósseis ou de queimadas da vegetação, é um dos principais responsáveis pelo aumento da temperatura na terra, e, por consequência, pelo aumento do nível dos mares e pela variação dos eventos climáticos. Uma alternativa viável para amenizar o agravamento deste processo, que pode colocar em risco a vida na terra, consiste no armazenamento do carbono atmosférico pelas florestas (RENNER, 2004).

Os ciclos do carbono e do oxigênio na natureza são processos fundamentais na transformação constante das substâncias orgânicas que constituem a biosfera, definida como o ambiente onde se desenvolvem os fenômenos biológicos. Na primeira etapa do ciclo, a da fotossíntese, as partes verdes das plantas absorvem o dióxido de carbono atmosférico e o fazem reagir com a água, servindo-se da luz solar e da presença da clorofila. Formam-se, assim, compostos de carbono complexos que vão constituir a estrutura do vegetal, com a consequente liberação de oxigênio. Esse gás que passa ao ar é utilizado na respiração de bactérias, de animais e das próprias plantas, ocorrendo o processo inverso das trocas gasosas, no qual o oxigênio é captado e o dióxido de carbono despendido encerrando o ciclo

(TAIZ; ZEIGER 2004; WIKIPÉDIA, 2006; APPENZELLER, 2004).

A redução dos ecossistemas tropicais, determinada pelos processos degenerativos resultantes da desordenada atividade humana sobre esses ambientes, restringiram a Floresta Atlântica a apenas 7,3% de sua cobertura original. Os diferentes graus de interferência nesses ambientes são agora alvos de estudo no sentido da utilização sustentável dos recursos naturais e da conservação do estoque de carbono contido nos solos, florestas e outros tipos de vegetação, de forma a cooperar com a redução da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

A preocupação com relação à intensificação dos eventos climáticos atípicos tem gerado a possibilidade de captação de recursos financeiros advindos dos países do Anexo I do Protocolo de Kyoto, (países desenvolvidos), que é composto por países que possuem economias fortes e altos indicadores sociais, tais como qualidade de vida dos seus habitantes (WIKIPÉDIA, 2006).

Para que a captação de recursos financeiros seja possível, são necessários trabalhos de geração de mapeamentos temáticos de biomassa e quantidade de carbono armazenado, utilizando diferentes tipos de satélites/sensores. Contudo, ainda não existem registros de pesquisas que integrem dados de diferentes escalas e fontes como inventários florestais e imagens satélites,

para a obtenção de mapas de distribuição de dados biofísicos para florestas naturais.

A utilização das Redes Neurais Artificiais (ANN), que são um conjunto de técnicas não-paramétricas, pode ser utilizada como método alternativo para o mapeamento de padrões de entrada e de saída de classes associadas. Com o uso de um conjunto de pares de treinamento, valores de entrada são multiplicados por pesos e somados, gerando os valores de ativação do neurônio; os valores de saídas são comparados aos vetores observados e, com base em um limiar de erro, são aceitos ou não (TODT, 1998).

O objetivo principal do presente trabalho foi verificar o desempenho das Redes Neurais Artificiais (ANN) na quantificação de biomassa arbórea e na quantidade de carbono orgânico armazenado no componente arbóreo de uma Floresta Ombrófila Densa.

## Metodologia

A seqüência metodológica adotada é sumarizada no fluxograma de procedimentos realizados, apresentados na figura 1.

## Descrição da área

As áreas florestais estudadas localizam-se entre os paralelos 27° 08' 34" e 27° 15' 37" latitude sul e entre os meridianos 49° 11' 57" e 49° 17' 28" longitude oeste de Greenwich, nos municípios de Apiúna e Presidente Nereu, Estado de Santa Catarina, como pode ser observado na figura 2 compreendem. Compostos pelo baixo, médio e alto vale do Rio Itajaí, os municípios compreendem uma área total de 3799,2 hectares.

## Inventário florestal - amostragem

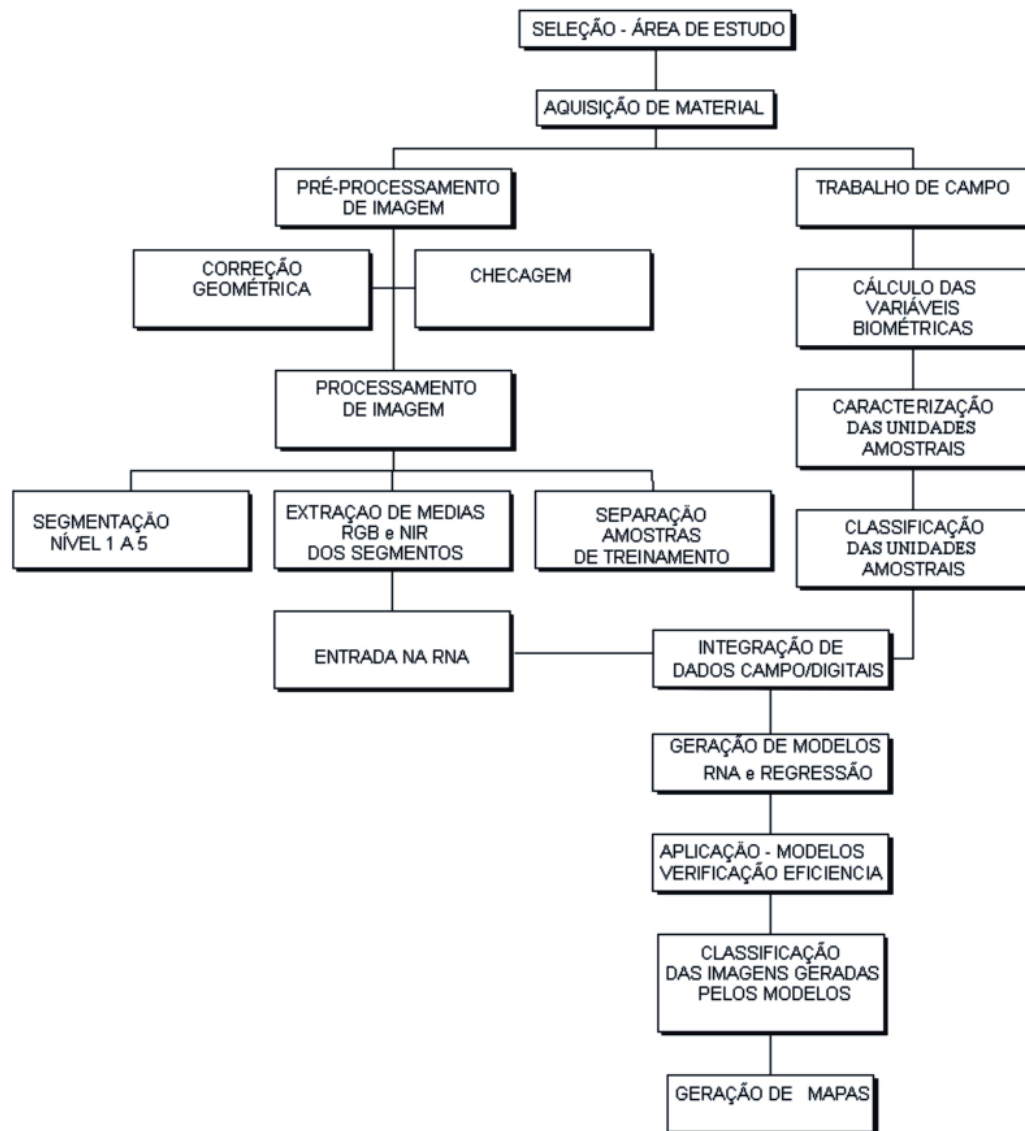
Considerando as condições da área amostrada e, com base em inventários prévios realizados na área, optou-se pelo Método de amostragem com Área Fixa, que utiliza um Processo de Amostragem Sistemática em Dois Estágios, com amostras alocadas de forma equidistantes, a cada 900 metros, conforme preconiza Péllico Netto e Brena (1997).

Essa escolha justifica-se pelo fato de que, em um processo sistemático, as unidades de amostra são selecionadas a partir de um esquema rígido e preestabelecido de sistematização, com o propósito de cobrir toda a população, em toda sua extensão, e obter um modelo sistemático simples e uniforme (LOETSCH; HALLER, 1973).

A localização das unidades de amostra é, em geral, mais fácil quando a amostra é sistemática do que quando a amostra é aleatória, uma vez que as unidades são distribuídas segundo a mesma orientação. Em decorrência disso, o tempo gasto em deslocamento para localizar as unidades amostrais é menor e o custo de amostragem é reduzido (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997).

## Unidade de amostra

A unidade de amostra utilizada foi de forma retangular, com 30 metros de largura por 90 metros de comprimento, perfazendo uma área de 2700 m<sup>2</sup>. A forma e a dimensão foram utilizadas para contemplar uma área visível e identificável na imagem do satélite IKONOS II, onde a resolução do *pixel* é de 16m<sup>2</sup>, sendo que a área da amostra possui assim um total de 168 *pixels*.

**Figura 1.** Fluxograma da metodologia empregada

Todas as árvores pertencentes à amostra e que possuíam circunferência a 1,30 metros do solo maiores do que 30 cm foram identificadas e medidas.

### **Intensidade de amostragem**

A determinação da intensidade de amostragem necessária para realização do inventário florestal da área de estudo foi feita a partir de volumes existentes,

oriundos de inventários florestais prévios realizados na área, e considerou diferentes níveis de erro e de probabilidade. Para a obtenção dos resultados, apresentados no tabela 1, foi considerada a variável volume, uma vez que não existiam dados disponíveis de biomassa e quantidade de carbono armazenado.

Diante desses resultados, optou-se por realizar 50 amostras de 30 metros de

**Tabela 1.** Resultados de intensidade amostral obtida considerando diferentes níveis de erro e probabilidades

ERRO DESEJADO	PROBABILIDADE DESEJADA	$N_0$	$N_1$	$N_2$
10% da média = 2,10	95% - $t_{5\%} = 2,04$	343	318	318
10% da média = 2,10	90% - $t_{10\%} = 1,70$	241	228	228
10% da média = 2,10	80% - $t_{20\%} = 1,31$	145	144	144
20% da média = 4,19	80% - $t_{20\%} = 1,31$	37	36	36

largura por 90 metros de comprimento, perfazendo 2700m<sup>2</sup> por unidade de amostra. Esse número resultou de um balanço do custo/benefício entre realizar-se 145 amostras para um erro de 10% da média com um nível de 80% de probabilidade, que é em um número muito grande considerando-se o custo para sua realização, ou uma intensidade de amostragem de 37 amostras, que permite a obtenção de estimativas com 20% de erro da média para uma probabilidade de 80%. Optou-se por

50 amostras para um erro de 20%, pois esse número assegura uma exatidão maior para o nível de probabilidade desejado (80%), além de levar em conta também que esses parâmetros são os normalmente usados em diversas atividades que envolvem a realização de inventários florestais.

Uma vez determinado o número de amostras, as mesmas foram locadas de forma sistemática e equidistantes entre si 900 metros, sobre um mapa reticulado da área, como pode ser visto na figura 3.

**Figura 2.** Localização da área de estudo





Figura 3. Carta imagem da localização das amostras inventariadas

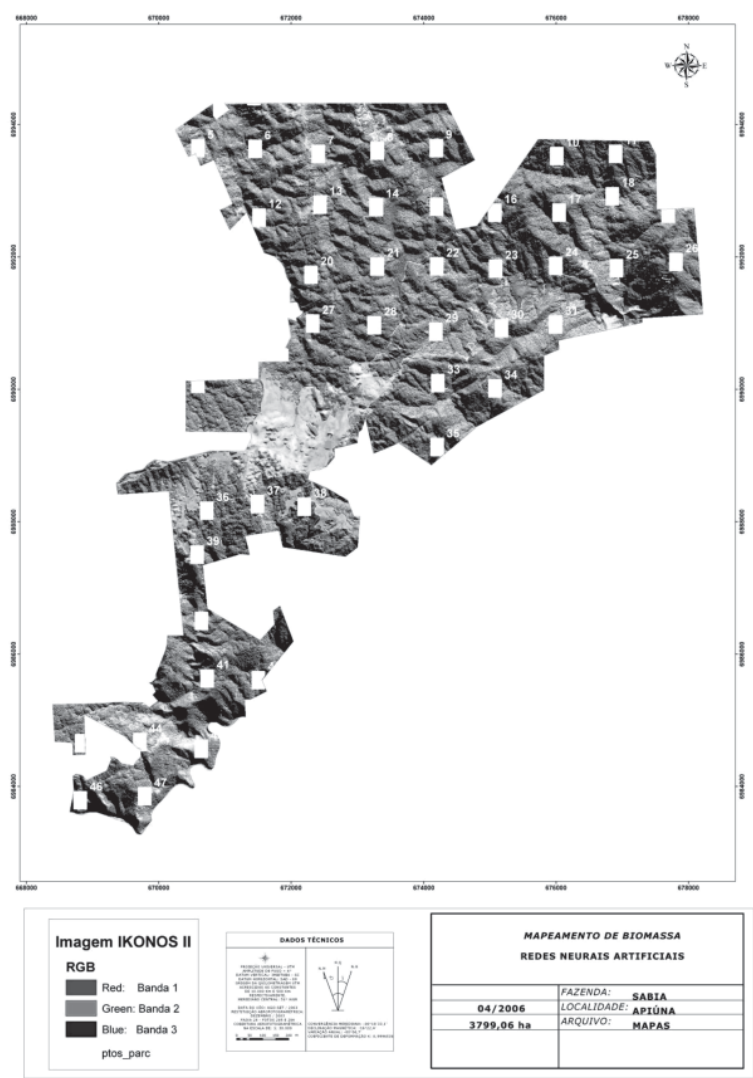


Tabela 02. Coordenadas dos pontos utilizados na correção e resíduos obtidos no ajustamento

OBSERVADO		CALCULADO		DIFERENÇA		ERRO	RMS
X	Y	X	Y	X	Y		
674883,23	6990863,95	674893,20	6990864,54	9,970	0,590	99,749	
672319,08	6993016,29	672313,73	6993021,03	-5,350	4,740	51,090	
671306,16	6989304,21	671302,53	6989306,65	-3,630	2,440	19,131	7,6064742
670718,89	6989201,16	670715,89	6989198,16	-3,000	-3,000	18,000	
668938,35	6984611,31	668942,54	6984606,22	4,190	-5,090	43,464	

## **Cubagem de árvores**

As espécies abatidas para quantificação da biomassa lenhosa acima do solo, selecionadas dentre os indivíduos que melhor representassem a variação diamétrica das mesmas, e que resultaram em 219 árvores de 75 espécies, foram cubadas para obtenção dos volumes e variáveis dendrométricas necessárias para o ajuste das equações alométricas.

## **Biomassa e carbono**

### **Quantificação da biomassa da vegetação arbórea**

A quantificação da biomassa da vegetação arbórea, aqui entendida como a vegetação acima do solo e que possui um diâmetro a 1,30 metro do solo (dap) maior ou igual a 10 cm, foi realizada pela utilização do método destrutivo, que abate e separa cada indivíduo em diferentes porções, considerando cada árvore como uma unidade amostral. As espécies abatidas para quantificação da biomassa lenhosa foram selecionadas a partir dos resultados obtidos no inventário florestal realizado na área, tendo como critérios para a seleção as espécies que apresentaram maior frequência e maior índice de valor de importância (I.V.I.). Espécies de alto valor ecológico ou econômico não foram abatidas.

Tendo sido realizada a seleção das espécies a serem medidas, procedeu-se a escolha dos indivíduos a serem abatidos de cada espécie, procurando-se selecionar indivíduos que melhor representassem a variação diamétrica das mesmas. Dessa

forma, foram selecionadas e abatidas um total de 219 árvores de 75 espécies diferentes, número esse satisfatório para efeito de avaliação da biomassa da vegetação arbórea. Esse número representa 1,64% do número total de indivíduos amostrados no inventário florestal, sendo que foram considerados aspectos de custo e de menor dano ambiental no abate dos indivíduos selecionados.

As árvores abatidas foram cortadas e separadas em porções referentes aos galhos vivos com folhas, galhos mortos, fuste com casca, frutos, flores e a porção denominada miscelânea (material que não se enquadrava em nenhuma das classes anteriores). Os componentes maiores da biomassa (fuste e galhos grossos), após serem separados em porções menores, foram pesados no campo com balança de braço, enquanto que os componentes menores foram pesados em balança mecânica com precisão de 0,1 g, na sede da área inventariada, onde foram acondicionados, identificados e armazenados em sacos de papel.

A determinação da biomassa dos galhos vivos, galhos mortos e miscelânea, foi feita separando-se e pesando-se cada porção. Para a biomassa das folhas, foi tomada e pesada uma segunda amostra menor de galhos com folhas. A seguir, foram retiradas e pesadas todas as folhas dessa amostra e, com os pesos resultantes, foi possível determinar uma razão entre o peso das folhas e o peso dos galhos vivos com folhas, permitindo a obtenção do peso total da biomassa das folhas pelo uso da razão encontrada.



### Determinação do teor de umidade e teor de carbono

Os diferentes tipos de amostras coletadas, que contemplam o tronco, a casca, os galhos vivos, os galhos mortos, as folhas, a miscelânea e a vegetação do sub-bosque foram acondicionados em sacos de papel, identificados e enviados ao Laboratório de Ecologia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria. Em laboratório, essas amostras foram secas em estufa de renovação e circulação de ar, a uma temperatura constante de 75°C até atingir o peso constante, para posterior determinação dos pesos secos e preparação das análises químicas para a obtenção dos teores de carbono. As análises do teor de carbono, nos diferentes tipos de amostras, foram executadas de acordo com o método WALKLEY-BLACK, com calor externo, proposto por Tedesco et al. (1995).

### Imagens orbitais

A imagem IKONOS II utilizada, com nível "Ortho Geo", foi adquirida com todas as suas bandas multiespectrais, *Red*, *Green*, *Blue* e *Infravermelho* (RGB e IV). A resolução espacial utilizada nesta pesquisa foi de 4 m, e a localização de precisão em torno de 15 m. A imagem foi entregue em formato digital (CD), com extensão "*\*tiff*" - 11 bits. A imagem estava georeferenciada, porém não ortoretificada.

A fim de realizar a ortoreificação, foi adquirido o modelo geométrico na forma de coeficientes numéricos (RPC - *Rational Polynomial Coefficients*) e o Modelo Digital do Terreno (MDT). Os modelos RPC relacionam as coordenadas objetos dos pontos (X,Y,Z) para as coordenadas do *pixel* da imagem (r,c).

O Datum horizontal da imagem e dos parâmetros de calibração do sensor foram coletados em WGS84. Por este motivo, optou-se em transformar a imagem do Modelo Numérico do Terreno (MNT) também para WGS84, o que foi realizado pelo programa *ENVI* 4.1. Após o processo, a imagem ortoretificada foi transformada para SAD69.

Foram coletados em campo 5 pontos com GPS topográfico para a validação da ortoreificação o que fundamentou a avaliação da imagem gerada. Ao examinar o resultado da ortoreificação, pode-se verificar as diferenças existentes entre a imagem ortoretificadas e os pontos de verificação. As diferenças apresentadas foram da ordem de 7 m, conforme apresentado na tabela 2. Esse deslocamento foi aceito como válido, tendo em vista que foi realizado em uma área florestal com cobertura vegetal bastante densa. Além das dificuldades de se conseguir dados, as estimativas foram realizadas por meio de amostragem em parcelas de 2700 m<sup>2</sup>, que perfazem 168 *pixels* da imagem IKONOS II (4 m), seguindo recomendações descritas por Watzlawick (2003), sobre aumentar o tamanho das unidades amostrais para obter confiabilidades na hora de parear os dados do inventário florestal aos dados obtidos das imagens de satélite.

Uma vez realizada a ortoreificação, as variáveis de interesse biomassa e a quantidade de carbono total médio das parcelas foram pareadas aos dados médios de intensidade e brilho obtidos da imagem, a partir das quatro bandas do satélite, para a realização do ajustamento de observações. Uma vez realizado o ajustamento, por meio de simulação, as

quantidades de carbono e de biomassa foram ‘estimadas para toda a área de estudo.

### **Segmentação**

O processo de segmentação de imagens tem por objetivo fragmentar uma imagem em regiões homogêneas, considerando algumas de suas características intrínsecas como, por exemplo, o nível digital dos *pixels*, a forma ou a textura de uma região. Segundo KOK et al (2000), o objetivo da segmentação em sensoriamento remoto é definir regiões na imagem, correspondendo a objetos na superfície terrestre.

A seleção pelo método de segmentação foi baseada em aspectos práticos de implementação da metodologia de utilização do programa *eCognition* 4.0, que executa segmentação multi-resolução, baseada na forma e nos valores digitais dos objetos. O critério de semelhança é usado para definir a uniformidade dos segmentos.

Os parâmetros de segmentação foram definidos fixando-se o fator de escala da segmentação das imagens para os valores de dez, vinte, trinta, quarenta e cinquenta correspondente a cada nível de segmentação. No primeiro nível de segmentação a cor e a forma foram definidos com os valores de 0,7 e 0,3. Nos outros níveis foi utilizado o valor 0,5, uma vez que o interesse da segmentação deve ocorrer em relação aos níveis digitais considerando também a forma. O fato de se atribuir mesma importância a cor e a forma se deve, ao relevo da área de estudo, rede de drenagem marcante, e áreas de campo e estradas que auxiliaram no

agrupamento de segmentos semelhantes, separando os segmentos de floresta nativa.

O fator de forma teve seus valores de compacidade definidos como 0,4 e suavidade como 0,6. O valor da suavidade é maior do que o da compacidade devido às fisionomias serem pouco compactas (talvez que apresentam a estrutura da serra geral).

As variáveis utilizadas na etapa seguinte para representar os segmentos na quantificação da biomassa e na quantidade de carbono foram as médias dos valores para cada uma das imagens de entrada, a serem processadas na ANN.

### **Redes neurais artificiais**

Uma RNA pode ser definida, de modo simplificado, como um arranjo de unidades, neurônios interconectados, que trabalham em paralelo para classificar e generalizar dados de entrada em classes de saída (BOTELHO; CENTENO, 2005).

As redes neurais são organizadas em camadas conectadas, podendo ser a “camada de entrada”, a(s) camada(s) escondida(s) ou oculta(s) e a camada de saída. Na camada de entrada, onde não ocorre processamento, os dados são apresentados à rede. A camada de entrada se comunica a uma ou mais camadas ocultas onde ocorre o processamento por meio de um sistema de conexões ponderadas. A camada de saída apresenta o resultado do processamento. O funcionamento da rede é determinado pela conexão entre as unidades de processamento, definida pelos pesos de cada ligação (GERMAN; GAHEGAN, 1996).

Partindo do pressuposto que os valores de biomassa arbórea e de quantidade de carbono obtidos no inventário florestal

da área são os verdadeiros, foram realizadas duas séries de experimentos, um para biomassa e outro para a quantidade de carbono. Esses experimentos visaram avaliar o desempenho das ANN na fase de treinamento, ou seja, avaliar se as amostras de verificação foram corretamente classificadas. Na primeira série, os dados foram analisados para a variável biomassa e, na segunda, série os dados de quantidade de carbono, ambas em nível de segmentos. Foi utilizada para este trabalho uma rede neural multicamada com aprendizado retropropagação; esse algoritmo foi otimizado por Reidmiller (1993) e está disponível no *software* MATLAB.

Em ambos os casos o conjunto de parâmetros foi modificado visando identificar aqueles que minimizavam os erros e tendo como referência os valores da imagem IKONOS II. Os valores digitais médios dos segmentos dessas imagens representam as variáveis de entrada de cada série. A quantidade de interações foi variável com o Erro Quadrático Médio (E.Q.M.) definido em quatro categorias. Os valores, apresentados na

tabela 3, referem-se aos intervalos de E.Q.M testados, ao número de camadas da ANN e à quantidade de neurônios em cada camada.

Utilizando as equações ajustadas e selecionadas, foram geradas novas imagens, com os pesos calculados no treinamento e aplicados aos valores médios das bandas RGB e NIR dos segmentos. Cada segmento passou a representar a quantidade estimada da variável biomassa arbórea ou da quantidade de carbono, para toda a área de estudo.

O número de neurônios da primeira camada foi definido como aproximadamente 1/3 das amostras de treinamento e de 1/4 do número de neurônios da primeira camada.

Foram testados três valores para o Erro Quadrático Médio na arquitetura da rede, a saber, arquitetura com limiar baixo (0,0001), intermediário (0,005) e alto (0,01).

O treinamento foi realizado com 38 amostras, do total de 48 coletadas, sendo que cinco tomadas de forma aleatória não foram usadas no treinamento e deixadas

**Tabela 3.** Limiares de erro e parâmetros testados na rede neural artificial

ERRO QUADRÁTICO MÉDIO	CAMADA DE ENTRADA	CAMADA ESCONDIDA
0,01	12	4
0,01	24	8
0,01	48	16
0,001	12	4
0,001	24	8
0,001	48	16
0,005	12	4
0,005	24	8
0,005	48	16
0,0001	12	4
0,0001	24	8
0,0001	48	16

**Tabela 4.** Comparação da biomassa real e estimada, para doze neurônios na camada de entrada e quatro na camada escondida para o limiar 0,01

PARCELA	BIOMASSA (kg)		RESÍDUO	ERRO %
	REAL	ESTIMADA		
21	93.223,54	86.177,55	7.045,99	8,18
8	187.175,91	185.231,58	1.944,33	1,05
36	162.205,67	151.924,05	10.281,62	6,77
24	153.075,24	150.906,32	2.168,92	1,44
30	181.392,53	179.253,14	2.139,39	1,19
Total	777.072,89	753.492,64	23.580,25	18,62
Média	155.414,58	150.698,53	4.716,05	3,73

para a validação do treinamento e outras cinco não foram utilizadas porque não possuíam recobrimento da imagem.

## Resultados

### Resultados da rede neural artificial para biomassa arbórea

As arquiteturas que empregaram o limiar mais alto foram as que apresentaram os melhores resultados, apresentados na tabela 4. A definição da arquitetura da ANN mais apropriada foi baseada no modelo que garantiu a convergência em um número menor de iterações (tempo computacional operacional) e que assegurou a qualidade das informações geradas. Os melhores resultados da arquitetura da rede foram os obtidos com um Erro Quadrático Médio de 0,01, que proporcionaram os menores erros percentuais, definindo dessa forma a escolha da arquitetura definitiva de classificação.

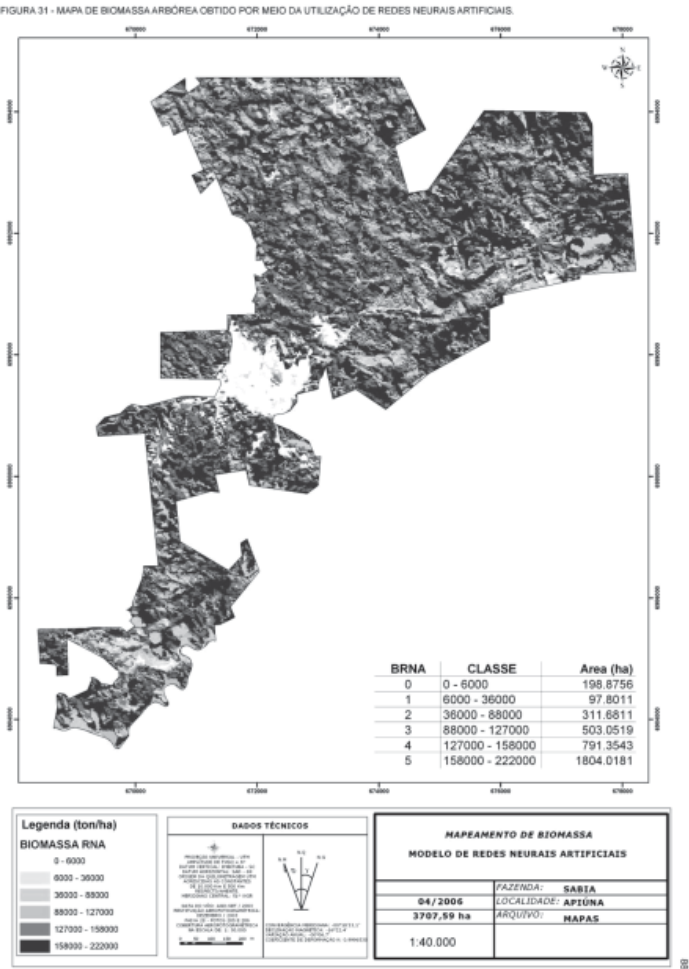
Por se tratarem dos melhores resultados, são discriminados os valores estimados e observados para cada arquitetura definida.

Os resultados da tabela 4 indicam que as diferenças entre a biomassa

real e a estimada com a utilização desta arquitetura foram satisfatórias, apresentando erros que variaram de 1,19 a 8,18%, todos abaixo de 10% e também que houve uma menor variação entre eles, para um erro percentual médio de 3,73%, o menor de todos os encontrados.

Para obtenção do mapa de biomassa da parte arbórea, foram geradas novas imagens utilizando os coeficientes calculados pela ANN, onde cada segmento passou a representar a quantidade estimada da variável biomassa arbórea. No mapeamento, foram utilizados intervalos de classes para melhor avaliar e verificar a aplicação e a interação dos modelos matemáticos com as imagens, os quais tomaram por base os levantamentos realizados em campo. Dessa forma, inicialmente, os dados reais obtidos para as amostras no inventário florestal foram classificados em cinco classes de produção, em kg ha<sup>-1</sup>. Uma vez feita a classificação dos valores das amostras em classes, os valores estimados foram agrupados nessas classes, calculando-se a seguir as áreas existentes em cada classe de produção. O resultado do mapeamento para a biomassa arbórea no fragmento

**Figura 4.** Mapa de biomassa arbórea obtido por meio da utilização de redes neurais artificiais



de Floresta Ombrófila Mista Montana é apresentado na figura 3.

**Resultados da rede neural artificial para quantidade de carbono**

Os procedimentos utilizados para a obtenção da quantidade de carbono armazenada foram, em essência, similares aos aplicados na estimativa da biomassa arbórea. A segunda série de experimentos foi feita visando verificar se as amostras

de verificação foram corretamente classificadas para a quantidade de carbono. Se na primeira série os dados foram analisados para biomassa arbórea, nessa segunda série as dados de entrada originaram as imagens de saída de carbono, ambas em nível de segmentos.

Considerando a experiência adquirida quando do processamento da primeira série, o conjunto de parâmetros foi modificado, aplicando-se apenas as seqüências que se mostraram mais

promissoras para a biomassa arbórea. Diante disso, os valores digitais da imagem do satélite IKONOS II representaram as variáveis de entrada de cada série, a quantidade de iterações foi variável e o Erro Quadrático Médio foi fixado em quatro categorias. Na Tabela 03 foram apresentados os intervalos testados para o E.Q.M., o número de camadas da ANN e a quantidade de neurônios em cada camada, valores esses que viriam a definir a arquitetura da ANN para a estimativa da quantidade de carbono.

Para as estimativas da quantidade de carbono essa arquitetura apresentou o segundo melhor resultado, com homogeneidade semelhante aos dados do inventário florestal. Houve uma diminuição do erro percentual médio, apesar da diferença desse para o obtido nas arquiteturas apresentadas anteriormente não serem significativas.

Os melhores resultados foram obtidos com a arquitetura de 12 neurônios na camada de entrada e 4 neurônios na camada escondida. Os valores observados e estimados são apresentados na tabela 5

Os resultados obtidos mostram um erro médio da estimativa baixo (3.6%)

com todas as amostras apresentando erro percentual abaixo de 10%, o que atesta a eficiência do método sob essa arquitetura. O erro percentual apresentou uma amplitude de - 0,78 a 8,2%, com uma variação pequena entre os valores, levando à conclusão dessa ser a melhor arquitetura dentre as testadas.

Tendo sido definida a melhor arquitetura para a ANN, a quantificação e mapeamento da quantidade de carbono para um fragmento de Floresta Ombrófila Densa pela aplicação do modelo selecionado pode ser realizado.

Utilizando os coeficientes calculados pela ANN, foram geradas novas imagens, onde cada segmento passou a representar a quantidade estimada da quantidade de carbono presente. Para fins de mapeamento, os valores de quantidade de carbono observada foram classificados em cinco classes de produção, em kg ha<sup>-1</sup>. Uma vez obtidas as classes de produção reais, utilizando as equações ajustadas e selecionadas, foram geradas novas imagens, com os pesos calculados no treinamento aplicados aos valores médios das bandas RGB e NIR dos segmentos.

**Tabela 5.** Comparação da quantidade de carbono real e estimada, para doze neurônios na camada de entrada e quatro na camada escondida para o limiar 0,01

PARCELA	CARBONO (kg)		RESÍDUO	ERRO %
	REAL	ESTIMADO		
21	93.223,54	86.182,51	7.041,03	8,17
8	187.175,90	184.052,67	3.123,24	1,70
36	162.205,70	152.095,62	10.110,05	6,65
24	153.075,20	149.775,67	3.299,57	2,20
30	149.072,20	150.241,45	-1.169,25	-0,78
Total	744.752,60	722.347,92	22.404,64	17,94
Média	148.950,51	144.469,58	4.480,94	3,59



Cada segmento passou a representar a quantidade estimada de carbono para toda a área de estudo, gerando o mapa apresentado na figura 4.

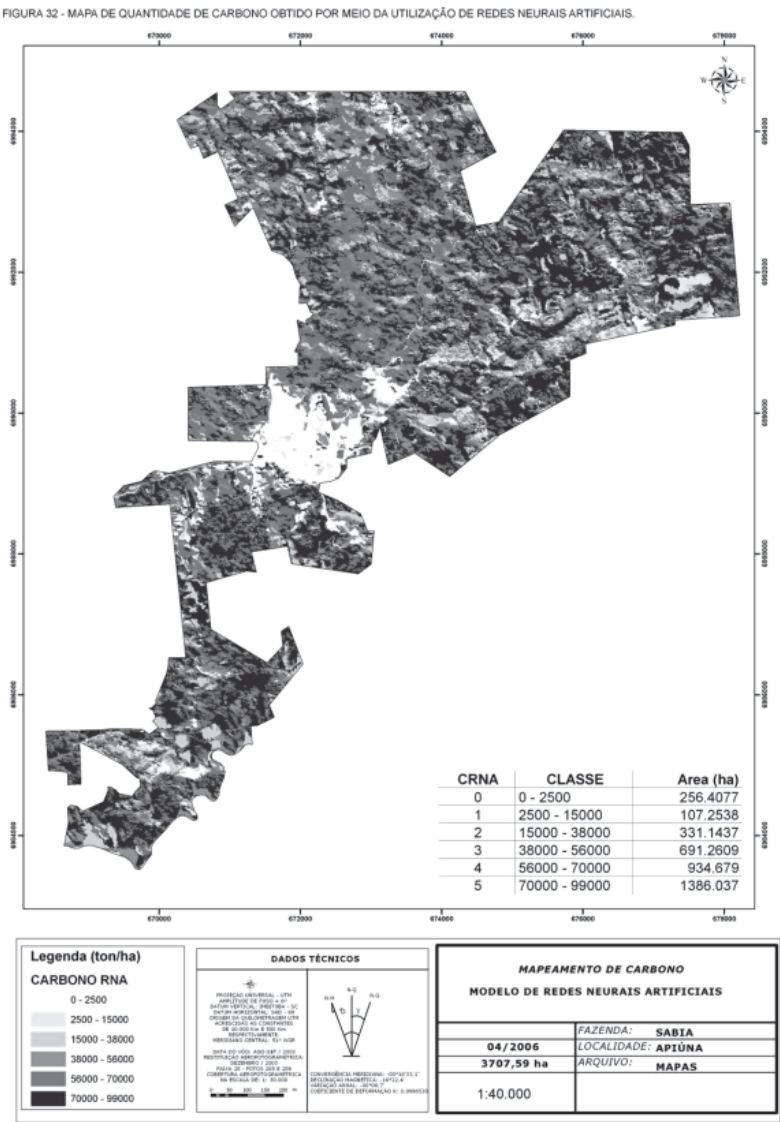
Conclusões

Os resultados obtidos no presente trabalho, nas condições em que os

dados foram coletados, evidenciaram que:

- a aplicação da técnica de Redes Neurais Artificiais (ANN) foi efetiva na obtenção de estimativas de biomassa arbórea e na quantidade de carbono orgânico armazenado, bem como produziu mapas temáticos eficazes em Floresta Ombrófila Densa;

Figura 5. Mapa de quantidade de carbono obtido por meio da utilização de redes neurais artificiais



- a utilização de ANN possibilita a utilização de variáveis de diferentes origens e escalas, permitindo sua integração e geração pelo emprego de fórmulas matemáticas;

- a utilização da segmentação na modelagem das redes neurais, mostrou-se eficiente pois permitiu a correlação entre as imagens, aumentando o grau de aprendizado da ANN;

- a definição da arquitetura da ANN mostrou-se trabalhosa por iniciar-se de forma empírica, exigindo refinamento do usuário em relação ao conhecimento da área de estudo;

- a integração de dados de diferentes origens mostrou ser uma vantagem da

ANN em estudos dessa natureza em relação a outras técnicas, pois permite a automação na separação de classes e na obtenção das estimativas desejadas, pois não exige o estabelecimento de padrões de interpretação visuais;

- a classificação obtida, representada pela quantificação da biomassa arbórea e da quantidade de carbono armazenada atingiu os objetivos no que diz respeito à convergência e ao Erro Quadrático Médio especificado;

- as estatísticas obtidas na comparação entre os valores estimados e os valores das amostras de validação atestam a eficiência do uso da técnica de ANN.

## Referências

APPENZELLER, T. *O caso da fuga do carbono*. National Geographic Magazine Portugal. disponível em<<http://www.nationalgeographic.pt/revista/2004/feature5/default.asp>> Acesso em: 10 jan. 2006.

BOTELHO, M.; CENTENO, J. Uso integrado de imagem de alta resolução espacial e altura derivada do laser scanner na escolha do classificador orientado a região. *Boletim de Ciências Geodésicas*, América do Sul, 11 17 08 2005.

GERMAN, G.W.H.; GAHEGAN, M.N. Neural network architectures for the classification of temporal image sequences. *Computers Geosciences*, v.22, n.9. 969-979p. 1996.

LOETSCH, F.; HALLER, K. E. *Forest Inventory*. Munich, [s.n.]. 1973. 436 p. Vol. I.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D.A. *Inventário Florestal*. Curitiba, 1997. 316 p. Vol. I.

REIDMILLER, M.; BRAUN, H. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: the RPROP algorithm. *Proc. IEEE Int. Conf. On NN (ICNN)*. P. 586 – 591. San Francisco. CA. USA.1993.

RENNER, R. *Seqüestro de carbono e a viabilização de novos reflorestamentos no Brasil*. Curitiba: 2004.116f. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal) Universidade Federal do Paraná.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal*. Trad. SANTARÉM, E.R. et al. 3 ed. Porto Alegre: Artmed. 184-188p. 2004.

TEDESCO, M.J.; VOLKWEISS, S.J.; BOHNEN, H. *Análise de solos, plantas e outros materiais*. Porto Alegre, [s.n.]. 1975. 174 p.

TODT, V. *Avaliação do desempenho de classificadores neurais para aplicações em sensoriamento remoto*. Porto Alegre: 1998.232f. Tese (Doutorado em Geodesia) – UFRGS

WATZLAWICK, L.F. *Análise e estimativa de biomassa e carbono em floresta ombrófila mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do satélite Ikonos II*. Curitiba: 2003. Tese. (Doutorado em Ciencias Florestais) – Setor de Ciencias Agrárias – UFPR

WINKIPÉDIA – *Ciclo do Carbono*. A enciclopédia livre. Disponível em <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Ciclo\\_do\\_carbono](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ciclo_do_carbono)> Acesso em 10 jan. 2006.